

УДК 621.313.32

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.2.10

М.А. Колпакова¹, Е.А. Заборовцев^{1,2}, Е.А. Чабанов^{1,3}

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия

²ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания»,
Пермь, Россия

³Volga State University of Water Transport (Perm branch),
Пермь, Россия

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

На настоящий момент существует проблема обеспечения надежности работы электрических машин с целью увеличения срока ее эксплуатации. Применяются различные методы оценки технического состояния машин. Наибольший интерес представляют методы неразрушающего контроля состояния, поскольку невмешательство в конструкцию машины позволит продолжить ее эксплуатацию после проведения планово-предупредительных работ. Таким образом, снижается финансовая нагрузка на предприятие, так как чем дольше машина выполняет свои функции, тем меньше средств потратит организация на ее ремонтные работы и переоснащение. Со временем, в ходе использования, оборудование стареет и постепенно приходит в негодность, что может привести к аварийным ситуациям на производстве. Эта проблема с каждым годом становится все более актуальной не только в России, но и во всем мире. **Цель исследования:** исследовать возможности определения дефекта в синхронной машине на раннем этапе его появления с целью своевременного ремонта оборудования. **Методы:** рассматривается реализация метода оценки технического состояния синхронной машины с помощью вейвлет-анализа на примере: простых гладких сигналов из одной и двух синусоид; переходного процесса опыта внезапного симметричного короткого замыкания в синхронном турбогенераторе ТТК-50-2УЗ-П. Исследования проводились с применением программной среды LabVIEW. **Результаты:** исследования на примере гладких простых сигналов позволили выработать ряд рекомендаций при анализе вейвлетов реальных электрических машин. Исследования вейвлетов, их срезов и интегральных вейвлет-спектров переходных процессов в опыте внезапного симметричного короткого замыкания синхронного генератора позволили оценить техническое состояние рабочей машины на данный момент времени и выдвинуть гипотезу о наличии в ней дефектов. **Практическая значимость:** предложенный подход отличается большей объективностью и практичностью, чем другие методы, потому что анализу могут подвергаться электрические машины в рабочем режиме без снятия их с рабочих агрегатов. Вейвлет-анализ в отличие от спектрального анализа позволяет исследовать, кроме прочего, быстропотекающие переходные процессы.

Ключевые слова: синхронный турбогенератор, вейвлет-анализ, оценка технического состояния, переходные процессы, внезапное симметричное короткое замыкание, диагностика неисправностей.

M.A. Kolpakova¹, E.A. Zaborovtsev^{1,2}, E.A. Chabanov^{1,3}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²PJSC "Perm Scientific and Production Instrument Making Company",
Perm, Russian Federation

³Volga State University of Water Transport (Perm branch),
Perm, Russian Federation

EVALUATION OF THE TECHNICAL CONDITION OF SYNCHRONOUS MACHINES BASED ON WAVELET ANALYSIS

At the moment, there is a problem of ensuring the reliability of the operation of electrical machines in order to increase its service life. Various methods are used to assess the technical condition of machines. Methods of non-destructive state control are of the greatest interest, since non-interference in the design of the machine will allow its operation to continue after scheduled preventive work. Thus, the financial burden on the company is reduced, since the longer the machine performs its functions, the less money the organization will spend on its repair work and re-equipment. Over time, in the course of use, equipment ages and gradually deteriorates, which can lead to industrial accidents. Every year this problem becomes more and more urgent not only in Russia, but all over the world. **Purpose of the research:** to investigate the possibility of determining a defect in a synchronous machine at an early stage of its appearance in order to timely repair the equipment. **Methods:** the article discusses the implementation of the method for assessing the technical state of a synchronous machine using wavelet analysis on the example of: simple smooth signals from one and two sinusoids; transient process of the experience of a sudden symmetric short circuit in the synchronous turbine generator TTK-50-2UZ-P. The research was carried out using the LabVIEW software environment. **Results:** studies on the example of smooth simple signals made it possible to develop a number of recommendations for the analysis of wavelets of real electrical machines. Investigations of wavelets, their cuts and integral wavelet spectra of transient processes in the experiment of a sudden symmetric short circuit of a synchronous generator made it possible to assess the technical state of a working machine at a given time and put forward a hypothesis about the presence of defects in it. **Practical significance:** the proposed approach is more objective and practical than other methods, because electrical machines can be analyzed in operating mode without removing them from the working units. Wavelet analysis, in contrast to spectral analysis, makes it possible to investigate, among other things, fast transient processes.

Keywords: synchronous turbine generator, wavelet analysis, technical condition assessment, transients, sudden symmetrical short circuit, fault diagnosis.

Введение

Значение электрической энергии на данный момент велико из-за ее универсальности. Развитие электрических машин (ЭМ) с точки зрения теории и их практического применения в промышленности с каждым годом расширяется [1]. В настоящее время в основном идет процесс пересмотра и улучшения накопленных знаний. Из-за недостаточного финансирования на большинстве заводов не в состоянии проводить непрерывную модернизацию своего оборудования, поэтому машины старых лет все еще эксплуатируются на производстве. Каждая машина, даже при надлежащем уходе и обслуживании, нуждается

в ремонте, не говоря уже о тех, которые регулярно эксплуатируются. Чаще всего компании вынуждены уменьшать объем работы из-за ограниченных бюджетных средств [2]. Если не обнаружить, что какая-то часть ЭМ ломается или выходит из строя, то это может привести к потерям бюджета предприятия из-за незапланированного ремонта.

Для того чтобы избежать вышеупомянутой проблемы, используют оценку технического состояния электрической машины. Сегодня такой подход весьма популярен на предприятиях, так как влечет повышение надежности, снижает возникновение аварийных ситуаций, повышает уровень безопасности для рабочего персонала, а также уменьшает расход средств и потерь времени на внеплановые ремонты [3].

Существуют два метода контроля: разрушающий и неразрушающий. Разрушающий метод контролирует качество материала конструкции и элементов. С помощью данного метода можно получать количественные показатели материалов. К данному виду относятся: динамические испытания, испытания на вибропрочность и на ударную прочность, устойчивость к нагрузкам. Однако после такой диагностики ЭМ уже нельзя будет использовать в качестве рабочего или исследуемого объекта, поэтому на практике чаще всего при исследовании объекта разрушающий и неразрушающий методы контроля совмещают.

Неразрушающий метод контроля служит для того, чтобы определить работоспособность ЭМ. В данном методе проводят измерения множества параметров, что требует большого количества приборов, затрат времени и средств. Это может снизить эффективность диагностики и, как следствие, влечет большие убытки компании. Поэтому из всего широкого спектра параметров отбирают более удобные и информативные для дальнейшего использования, чтобы достичь требуемых результатов при наименьших расходах [4]. Полученные результаты также могут быть использованы для определения текущих значений параметров электрических машин (например, вероятностно-статистическими методами), что в дальнейшем позволит также оценить ее состояние [5, 6, 7].

Применение того или иного способа диагностики ЭМ зависит от характеристик в условиях контроля. При неразрушающем методе контроля о наличии дефектов судят по косвенным признакам при формировании измеряемых характеристик. Главная измеряемая характеристика – это первоначальная характеристика, с которой сравнивают

измеренное в данный момент времени значение и судят о наличии дефекта. Для того чтобы выбрать интересующий нас метод контроля, необходимо понимать, что он зависит от свойств и параметров исследуемого объекта.

К методам неразрушающего контроля относятся:

- акустические методы контроля;
- вибрационные методы контроля;
- виброакустический метод;
- магнитные методы контроля;
- тепловые методы контроля;
- радиационные методы контроля;
- электрические методы контроля [8].

Особый интерес представляют электрические методы контроля, поскольку они не требуют использования каких-либо сложных устройств или создания каких-либо специфических условий.

К электрическому методу контроля, определяющему состояние ЭМ, относится, например, спектральный анализ. С помощью этого метода можно достаточно быстро и с высокой точностью определять дефекты в электрической, магнитной или даже в механической части ЭМ [9]. Однако спектральный анализ позволяет достаточно точно определять дефекты в ЭМ только по установившимся режимам. Переходные процессы, особенно быстропротекающие, этим методом анализировать нельзя. В настоящее время развитие спектрального анализа привело к появлению вейвлет-анализа. Эта методика более сложная, но с ее помощью можно анализировать любые динамические режимы работы ЭМ [10].

Вейвлет-преобразование (ВП) – интегральное преобразование, которое представляет собой свертку вейвлет-функции с сигналом. ВП способен переводить сигнал из временного представления в частотно-временное [11]. Этот математический способ был реализован для замены классического спектрального анализа, который основан на преобразовании Фурье. Основное отличие заключается в том, что преобразование Фурье раскладывает сигнал на элементы в виде гармоник (синусоид различных частот), т.е. функций, локализованных в Фурье-пространстве, в то время как ВП использует функции, которые присутствуют как реальному, так и пространству Фурье. По аналогии с преобразованием Фурье ВП произвольного аналогового сигнала $S(t)$ заключается в том, что происходит разложение по базису. Разница в том, что

в основу базиса ложится локализованная по времени и частоте функция $\psi(t)$, имеющая ряд характерных особенностей. Формирование базиса осуществляется за счет сдвига по временной оси и ее перемасштабирования. Проводится анализ процессов с использованием локализованной функции, формируются характеристики и создается двумерная развертка сигнала $S(t)$, где частота и время воспринимаются как независимые переменные. На сегодняшний день вейвлеты широко применяются: при решении задач анализа и синтеза различных сигналов; для обработки изображений; для сжатия большого потока информации и цифровой фильтрации при решении некоторых дифференциальных уравнений и т.д. [12].

При необходимости разложения аналитически заданного сигнала применяют прямое непрерывное вейвлет-преобразование вида:

$$W_s(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (1)$$

где t – время, a – временной масштаб (аналогичен периоду осцилляций), b – смещение сигнала по оси времени; $S(t)$ – непрерывный входной сигнал; ψ – материнский вейвлет [13, 14].

Современные средства регистрации электрических сигналов (токов и напряжений) формируются на основе цифроаналоговых преобразователей, позволяющих фиксировать отдельные дискретные значения. В этом случае для оцифрованного сигнала вычисляют дискретное вейвлет-преобразование (ДВП):

$$W(a_j, b_k) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{i=0}^N S(t_i) \psi\left(\frac{t_i - b_k}{a_j}\right) \Delta t_i, \quad (2)$$

где i, j, k – индексы дискретизации по времени t , по масштабу a , по временному сдвигу b ; N – количество отчетов входного сигнала; Δt_i – шаг дискретизации входного сигнала; $S(t_i)$ – оцифрованный входной сигнал; ψ – вейвлет-функция [13,14].

На рис. 1 представлена программа, составленная в программной среде LabVIEW, которая вычисляет область для формирования параметров a, b и t . Функции отдельных блоков программы: 1 – область визуальных инструментов, где формируются параметры коэффициента a , который отвечает за масштабирование; 2 – область визуальных инструмен-

тов, где формируются параметры коэффициента t , который отвечает за временные интервалы; 3 – область визуальных инструментов, где формируются параметры коэффициента b , который отвечает за сдвиг по времени.

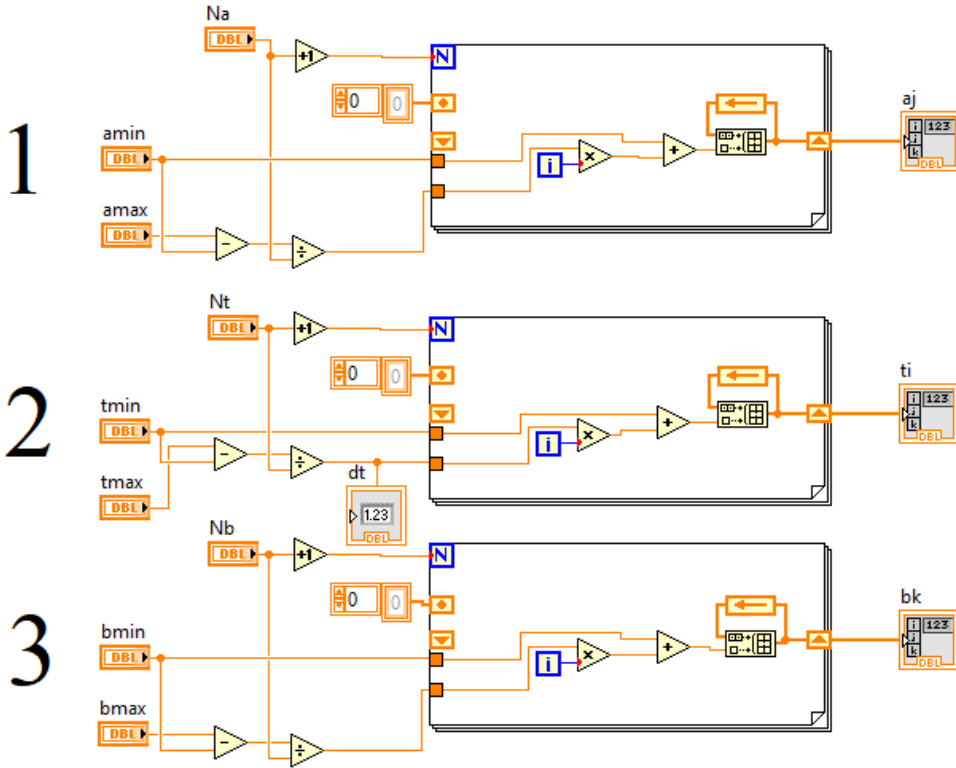


Рис. 1. Блоки для реализации параметров a , b и t в LabVIEW

На рис. 2 представлена программа, реализующая по формуле (2) ДВП для оцифрованного сигнала.

Согласно алгоритму формирования ДВП создается промежуточное значение x , зависящее от параметров a , b и t , а после формируется ψ – функция преобразования (материнский вейвлет) [15].

В качестве материнского вейвлета выступает функция, получившая название «мексиканская шляпа» – это вторая производная функции Гаусса, которая описывается уравнением:

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^3}} \left[e^{\frac{-x^2}{2\sigma^2}} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{\sigma^2} \right) \right], \quad (3)$$

где $x = (t - b)/a$, σ – параметр, отвечающий за масштаб вейвлета в зависимости от входного сигнала [16].

Вычисленный вейвлет, зависящий от двух переменных, выводится в виде трехмерной поверхности (рис. 2).

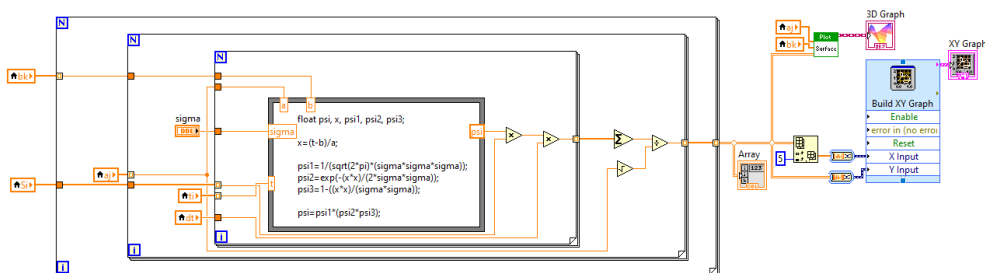


Рис. 2. Блок для реализации ДВП оцифрованного сигнала

С целью выявления закономерностей на поверхности вейвлета далее проводились исследования с применением вейвлет-преобразования к простому сигналу, состоящему из двух синусоид, формируемых по формуле:

$$S(x) = A\sin(\omega t - \varphi), \quad (4)$$

где $\omega=2\pi/T$.

Одна из синусоид имела удвоенную амплитуду. Также исследования проводились при изменении параметров: амплитуда, начальная фаза и период.

На рис. 3 представлен фрагмент программы – визуальный инструмент, который строит синусоиду по заданным частоте, амплитуде и начальной фазе.

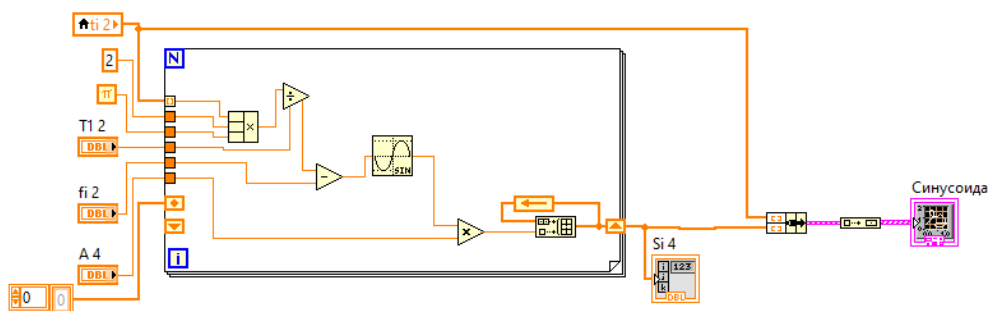


Рис. 3. Блок для реализации синусоиды в LabVIEW

Начальные параметры представлены в таблице и далее приведены графики с этими параметрами (рис. 4). На рис. 4–8 представлены 4 графика: 1-й график (верхний левый) – изображение синусоиды (входной оцифрованный сигнал); 2-й график (верхний правый) – трехмерная поверхность вейвлета; 3-й график (нижний левый) – срез вейвлета в виде двумерной характеристики при фиксированном временном сдвиге b ; 4-й график – интегральный вейвлет-спектр (ИВС) теоретически позволяет по наличию максимумов идентифицировать наличие ряда в анализируемом сигнале.

Начальные параметры для построения синусоиды

Амплитуда (A)	Период (T)	Начальная фаза (φ)	Масштабный коэф. (a)	Коэф. по времени (b)	Время (t)	Количество точек (N)
5	50	0	1...30	0...50	0...100	256 (по t) 50 (по a и b)

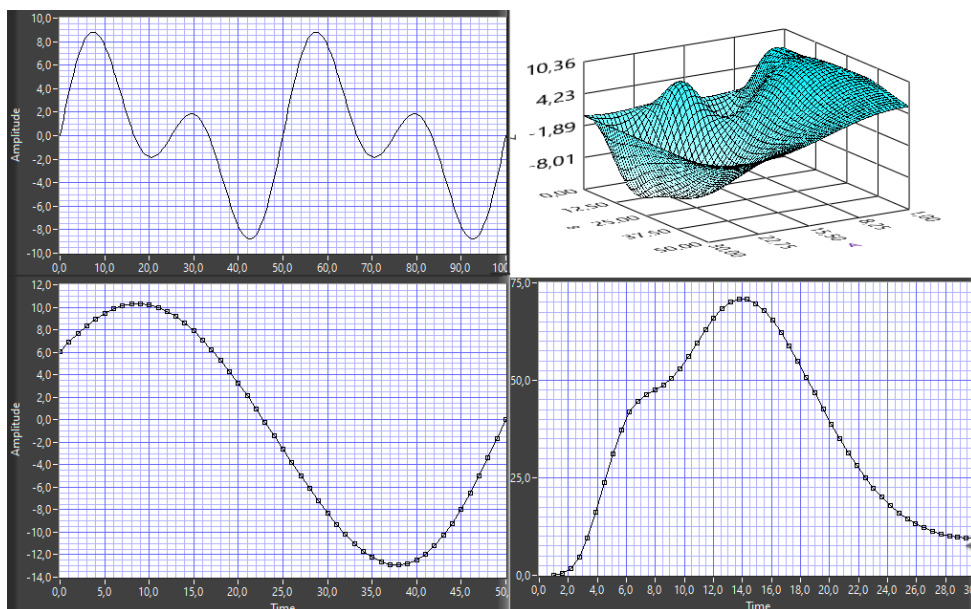


Рис. 4. Синусоида с начальными параметрами: $A=5$, $T=50$, $\varphi=0^\circ$

Исследование простого сигнала, состоящего из двух синусоид, показывает, что на вейвлете появляется подтверждение наличия в исходном сигнале гармоники с удвоенной частотой, а именно на поверхности появляются новые всплески. На ИВС синусоида с удвоенной частотой приводит к появлению дополнительных точек перегиба.

Исследования проводятся в сравнении с графиками по начальным условиям. Результаты исследований при изменении амплитуда $A=2$ и неизменных прочих параметрах представлены на рис. 5.

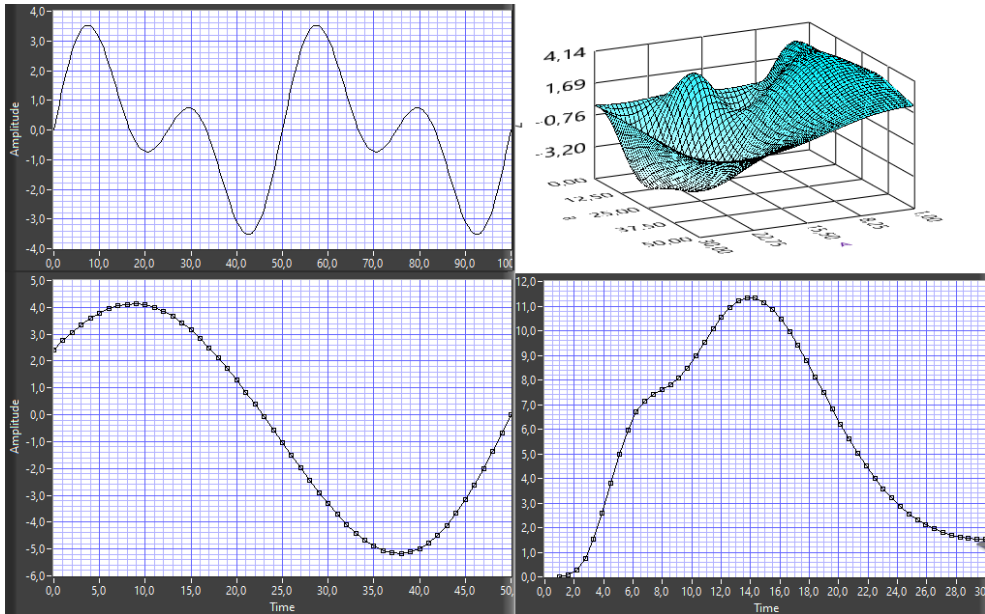


Рис. 5. Синусоида с параметрами: $A=2$, $T=50$, $\varphi=0^\circ$

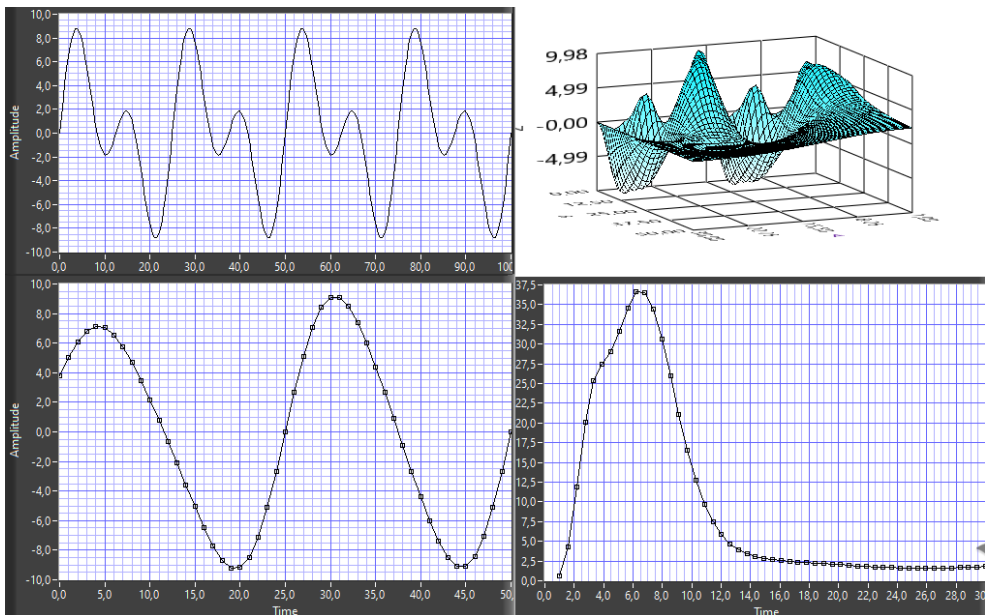


Рис. 6. Синусоида с параметрами: $A=5$, $T=25$, $\varphi=0^\circ$

При изменении амплитуды обеих синусоид меняется масштаб графиков, поэтому при их изображении в относительных единицах их форма практически неизменна. Характер сигнала такой же, как и в эксперименте с одиночной синусоидой. Результаты исследований при изменении периода колебаний $T=25$ с и неизменными прочими параметрами представлены на рис. 6.

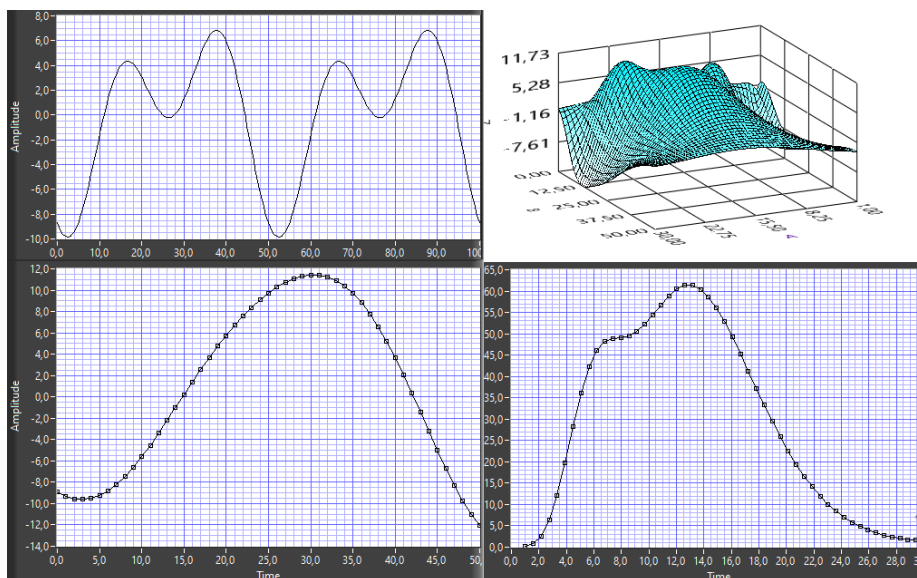


Рис. 7. Синусоида с параметрами: $A=5$, $T=50$, $\varphi=120^\circ$

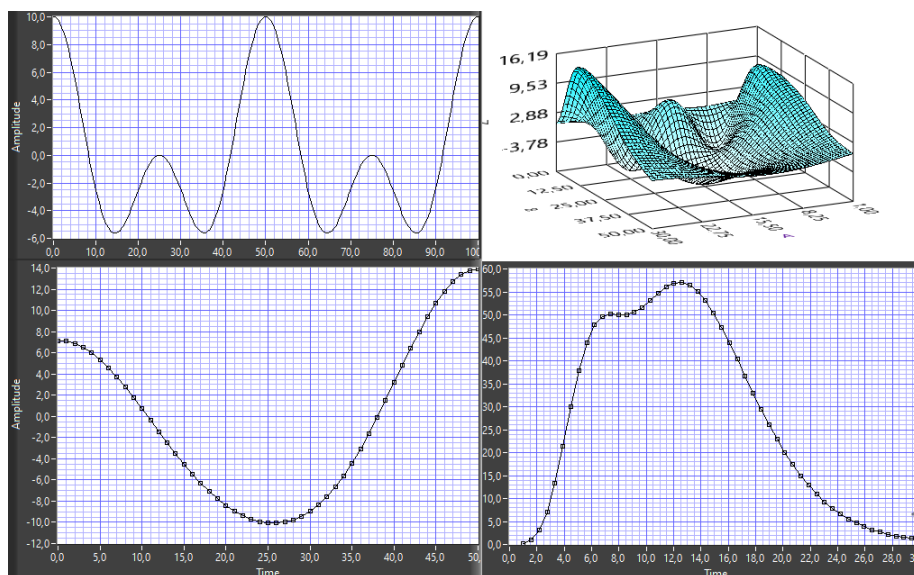


Рис. 8. Синусоида с параметрами: $A=5$, $T=50$, $\varphi=270^\circ$

При изменении периода на графиках изменяется только количество пиков, на трехмерной поверхности вейвлета заметен рост по оси W – увеличивается по высоте вейвлет-функция. На ИВС наблюдается движение вдоль масштабной координаты b , пиковое значение сдвигается. Результаты исследований при изменении начальной фазы $\varphi=120^\circ$, 270° и неизменных остальных параметрах представлены на рис. 7 и 8.

При изменении начальной фазы происходит временное смещение синусоиды в пространстве вдоль оси параметра b , и это приводит к движению вершин вейвлета от базового положения при $\varphi=0^\circ$ до положения при $\varphi=270^\circ$ ($\varphi=360^\circ$ – изображения будут точно такими же, как при $\varphi=0^\circ$). Далее на рис. 9 представлены результаты исследования при наложении на синусоиды шума величиной 50 % от амплитудного значения оцифрованного сигнала. Исследования проводились по представленному выше алгоритму. В ходе экспериментов наблюдались точно такие же изменения, как и при незашумлённом сигнале.

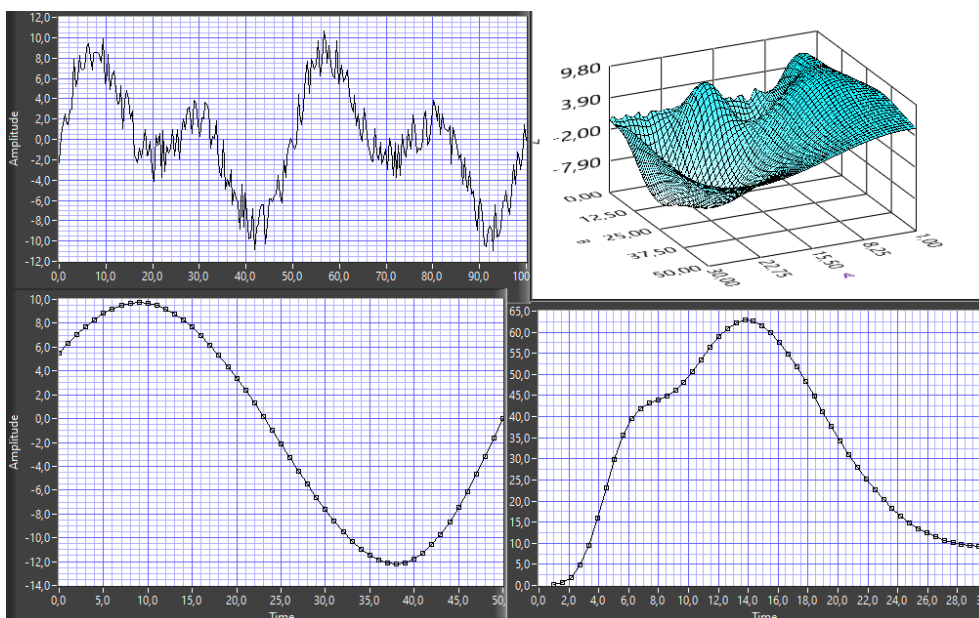


Рис. 9. Синусоида с параметрами: $A=5$, $T=50$, $\varphi=0^\circ$ и с шумом 50 %

На рис. 10–12 представлены результаты исследований при наложении двух синусоид: идеальной и с шумом 90 % (на графике голубой гладкий сигнал – идеальная синусоида; черный сигнал, меняющийся с высокой частотой, – зашумленная синусоида).

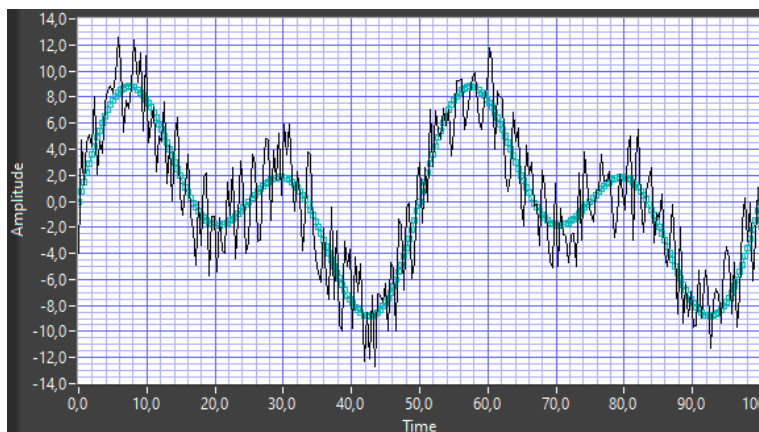


Рис. 10. Наложение двух синусоид

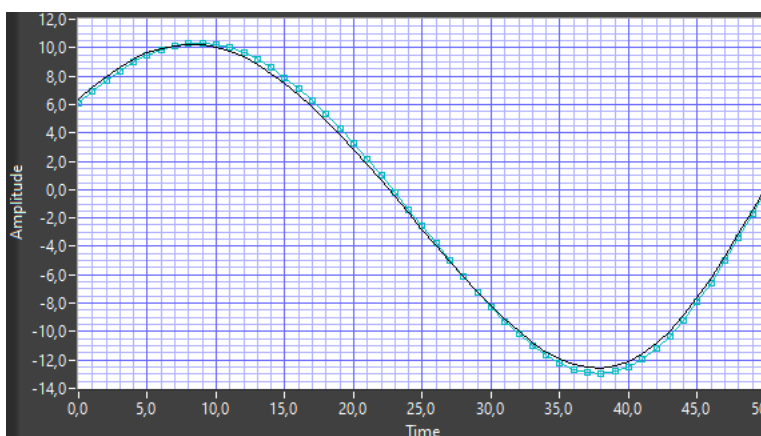


Рис. 11. Срезы вейвлетов

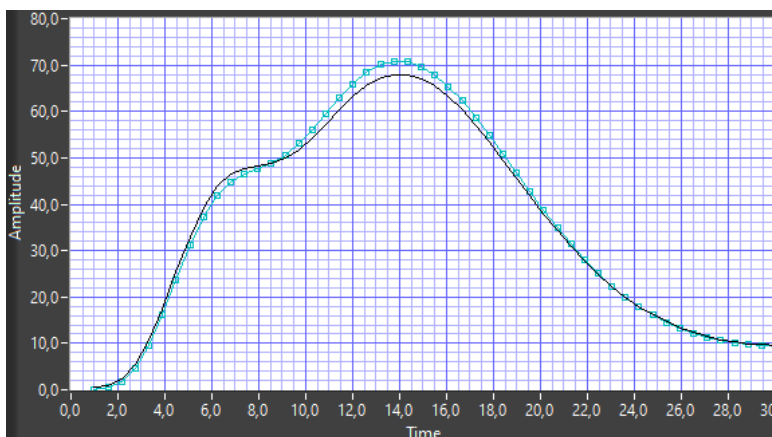


Рис. 12. ИВС вейвлетов

При наложении шума на двумерной графике виден зашумленный сигнал, отклоняющийся от идеального сигнала тем больше, чем больший шум на него накладывается. Что касается трехмерного графика вейвлета, то на нем появляются дополнительные возвышенности. Вдоль грани при $a=1$ наблюдается рваный край поверхности, это свидетельствует о том, что наложен шум в районе основания, и неровность становится более выраженной при увеличении шума. При достаточно сложной форме ИВС наблюдается отклонение ИВС идеального сигнала от ИВС зашумленного сигнала, что вполне логично.

Эксперименты с двумя синусоидами дали ясную картину. По результатам проведенных исследований можно сделать выводы и выявить некоторые закономерности:

1. Отчетливо видны шумы на поверхности вейвлета, а именно, с увеличением процента шума наблюдается увеличение всплесков (все зависимости закономерны). По величине флуктуаций (любое случайное отклонение) можно оценить величину шума и, следовательно, при необходимости очистить сигнал.

2. По частоте появления всплесков и впадин можно судить о наличии гармонических составляющих разных частот (рис. 13). Рисунок наглядно показывает распределение всплесков и впадин по временным интервалам и частотам. По одному из срезов, построенному для максимального значения ИВС, данного сигнала можно наблюдать распределение впадин и вершин. Следовательно, у представленного сигнала есть две гармонические составляющие: несущая частота – с одинарной частотой и вторая составляющая с удвоенной частотой.

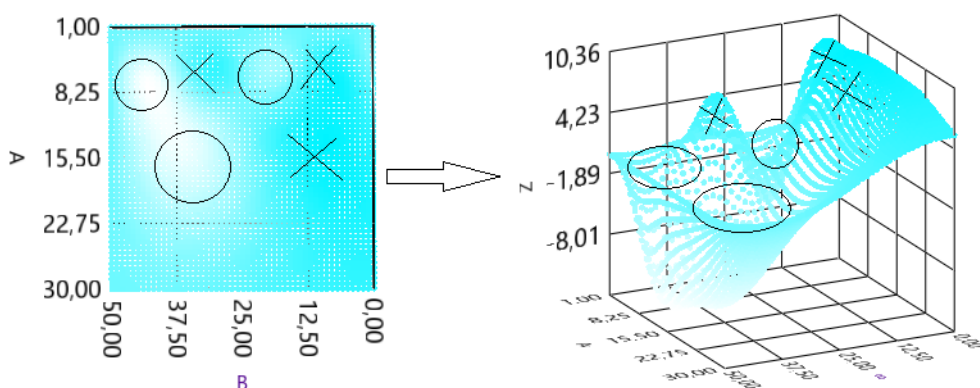


Рис. 13. Всплески и впадины на вейвлет-функции

Полученные знания позволят в дальнейшем оценить реальный переходный процесс, например, в опыте внезапного симметричного короткого замыкания турбогенератора ТТК-50-2УЗ-П.

Переходные процессы (ПП) в синхронных машинах появляются при различных аварийных режимах, синхронизации машины и изменении нагрузки. Изучать ПП синхронных машин необходимо на стадиях конструирования и эксплуатации. Они играют важную роль в формировании параметров для синхронной машины. К переходным процессам, которые наблюдаются на испытаниях синхронной машины, относятся опыты внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ). Опыт ВКЗ генератора – состояние, в результате которого в машине создается переходный процесс, устанавливающий новое значение напряжения на обмотке статора. Самый простой и наглядный способ проверки реального переходного процесса – это сравнение его с идеальным представлением, построенным по общеизвестным закономерностям [17].

Идеальный переходный процесс получен по формуле (5), которая была реализована в программной среде *LabVIEW* (рис. 14):

$$i = \left(\left(\frac{E_m''}{x_d''} - \frac{E_m}{x_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left(\frac{E_m}{x_d'} - \frac{E_m}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_m}{x_d} \right) \times \\ \times \cos(\omega t + \alpha_0) - \frac{E_m}{2} \left[\left(\frac{1}{x_d''} + \frac{1}{x_q''} \right) \cos \alpha_0 + \left(\frac{1}{x_d''} - \frac{1}{x_q''} \right) \cos(2\omega t + \alpha_0) \right] e^{-\frac{t}{T_d}}. \quad (5)$$

Параметры для вычисления идеального переходного процесса турбогенератора:

- напряжение, $E_m = 0,7$, о.е.;
- продольное переходное индуктивное сопротивление, $x_d' = 0,3$ Ом;
- продольное сверхпереходное индуктивное сопротивление, $x_d'' = 0,21$ Ом;
- переходная постоянная времени, $T_d' = 1$ с;
- сверхпереходная постоянная времени, $T_d'' = 0,8$ с;
- постоянная времени аperiodического тока, $T_a = 0,22$ с;
- продольное синхронное индуктивное сопротивление, $x_d = 2$ Ом;
- поперечное синхронное индуктивное сопротивление, $x_q = 2$ Ом;
- поперечное сверхпереходное индуктивное сопротивление, $x_q'' = 0,21$ Ом;
- начальная фаза тока короткого замыкания $\gamma_0 = 90$ °С.

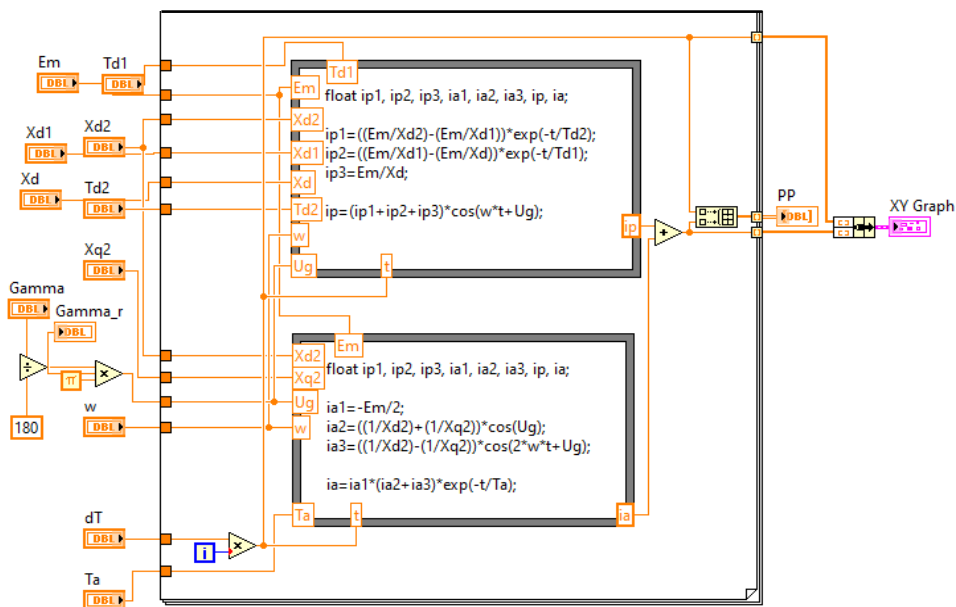


Рис. 14. Блок для реализации идеального переходного процесса

Реальный ПП был получен с помощью цифрового запоминающего осциллографа фирмы Лесроу при проведении на заводе-изготовителе испытаний синхронного турбогенератора ТТК-50-2У3-П [18]. Рассмотрен 3-й канал связи и представлены графики идеального и реального переходного процесса. На рис. 15 и 16 представлены идеальный и реальный переходные процессы в опытах ВКЗ при напряжении испытания $0,7 \cdot U_{ном}$.

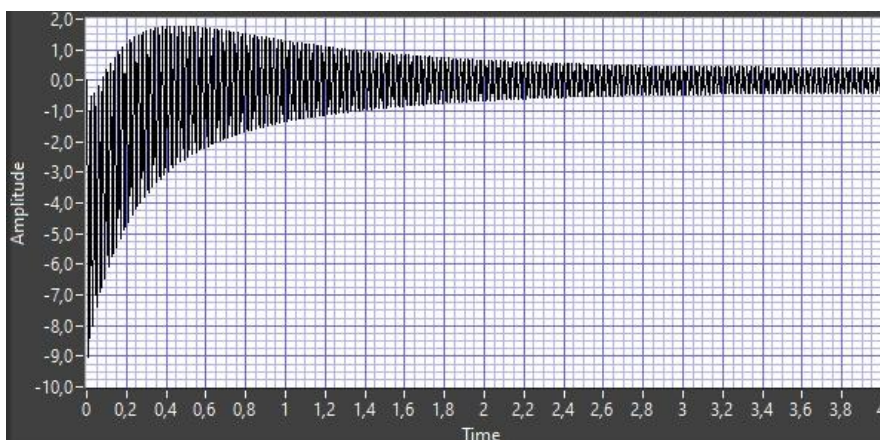


Рис. 15. Идеальный ПП канала 3 при напряжении испытания $0,7 \cdot U_n$

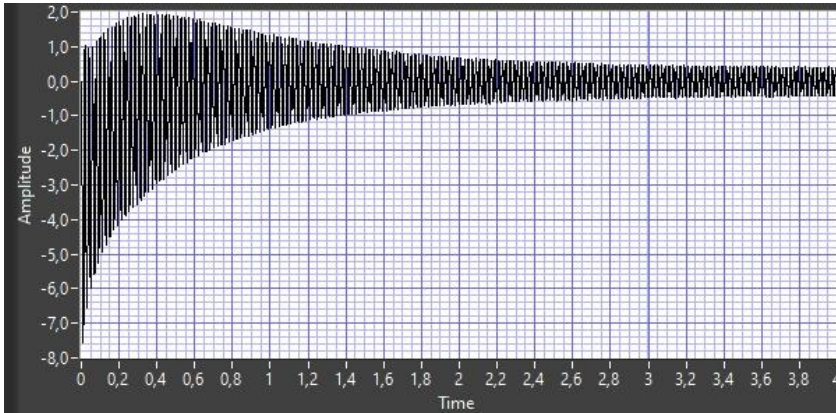


Рис. 16. Реальный ПП канала 3 при напряжении испытания $0,7 \cdot U_n$

Из рис. 15 и 16 видно, что формы реального и идеального ПП практически совпадают.

Вычисляя и строя вейвлет в переходном процессе, получаем изображение, представленное на рис. 17. Данный график недостаточно информативен, поскольку представляет собой плавно уменьшающуюся по вертикальной оси поверхность, поэтому для детального рассмотрения процесса был уменьшен интервал вдоль временного сдвига b . Переходный процесс длится 4 с, поэтому первоначально $b = 0 \dots 4$. Все вершины сливаются в один процесс, а с уменьшением b происходит масштабирование рисунка. Это приводит к «раздвиганию» графика, в результате чего наблюдаются вершины, свидетельствующие о том, что сигнал является не постоянным, а имеет гармонические составляющие. На рис. 17 этого не видно, а на рис. 18 отчетливо наблюдается, параметр b на рисунке находится в промежутке $0 \dots 0,25$.

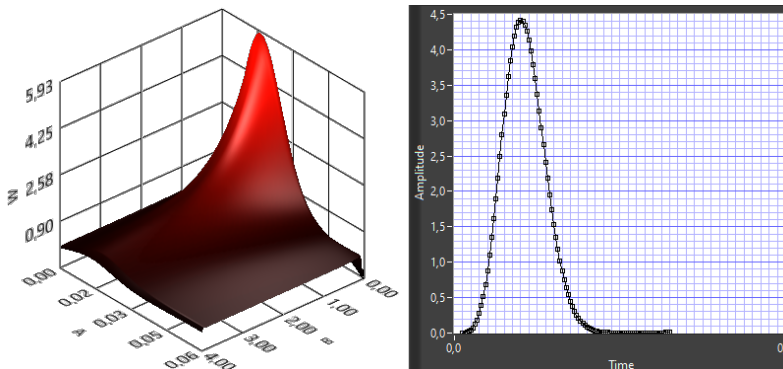


Рис. 17. Вейвлет идеального ПП $b = 0 \dots 4$ и его ИВС

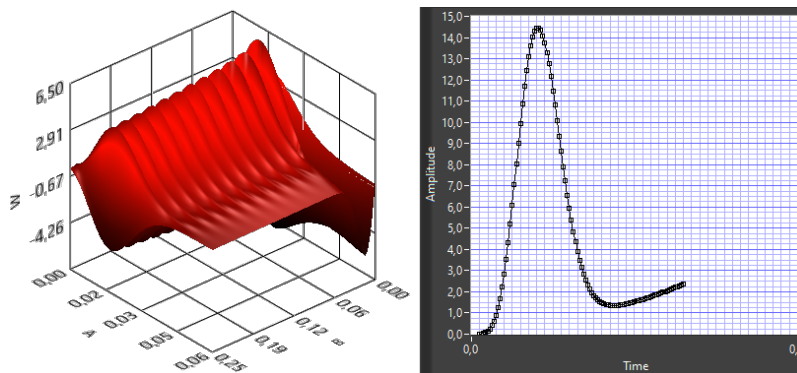


Рис. 18. Вейвлет идеального ПП $b = 0 \dots 0,25$ и его ИВС

Дальнейшее изменение временного сдвига b позволяет наблюдать отдельно стоящие вершины (рис. 19).

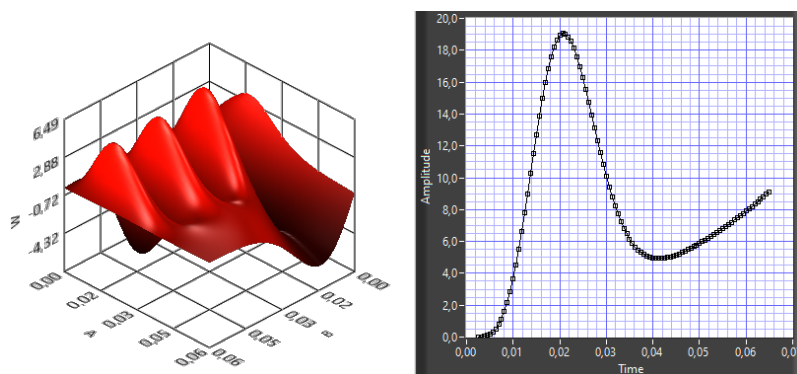


Рис. 19. Вейвлет идеального ПП $b = 0 \dots 0,06$ и его ИВС

Аналогичный график получаем для реального переходного процесса (рис. 20).

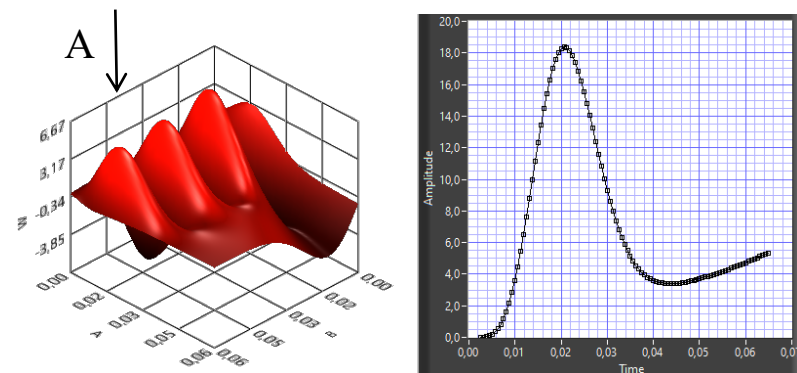


Рис. 20. Вейвлет реального ПП и его ИВС

Анализ графика, изображенного на рис. 20, в направлении вида А позволяет отследить отчетливую закономерность. Согласно рис. 21 расстояние между двумя всплесками (полное колебание) равно 0,02 с, что соответствует несущей частоте сигнала 50 Гц.

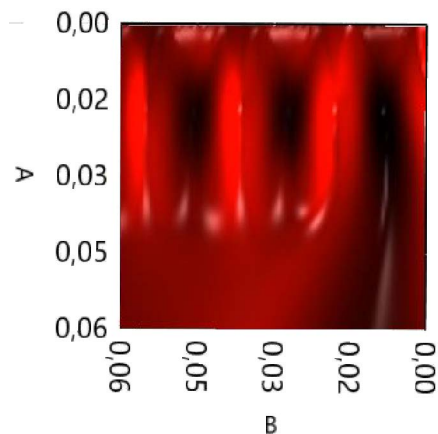


Рис. 21. Вид А вейвлета реального ПП $T = 0,02$ с

Дальнейшее масштабирование вейвлета в области малых значений параметра a (рис. 22) позволило наблюдать «рваный» край поверхности, что соответствует частотным составляющим более высокого порядка.

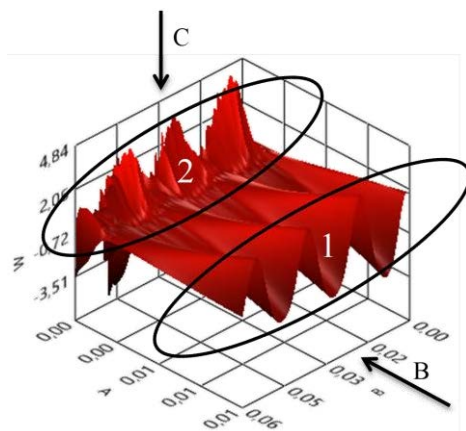


Рис. 22. Вейвлет реального ПП в области малых значений:
1 – частота несущая, 2 – область случайных факторов

На рис. 23 явно видно, что частота гармонических составляющих 2, значительно выше, чем несущая частота 1.

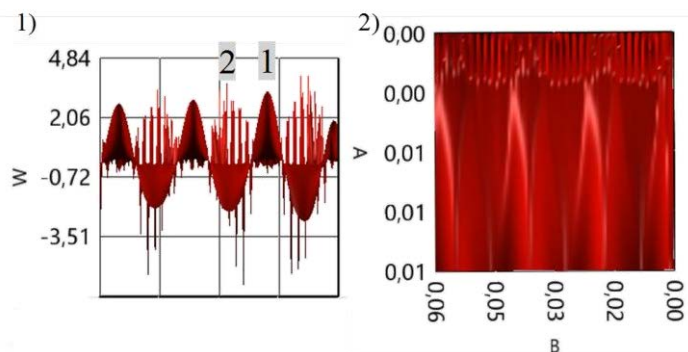


Рис. 23. Вейвлет реального ПП; 1 – вид В; 2 – вид С

Из графиков на рис. 23 видно: во-первых, всплески чередуются, и их частота весьма стабильна; во-вторых, всплески группы 2 являются гармоническими составляющими более высокого порядка. Следовательно, в реальной машине при записи сигнала осуществляются наводки, которые могут возникать по разным причинам, например, из-за измерительной аппаратуры или соединительных проводов, что и относится к случайным факторам.

Анализ ИВС обоих процессов, представленных на рис. 24, показывает, что максимум ИВС в реальном процессе смещается в область меньшего времени по b и отклонение значительное. Можно предположить, что машина имеет ряд неисправностей, которые влияют на показатели.

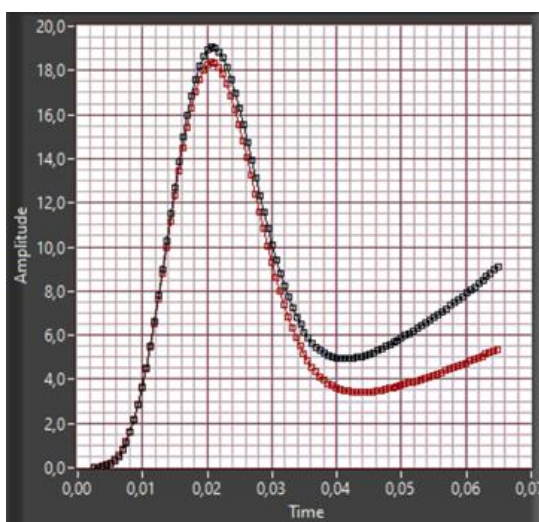


Рис. 24. Наложение ИВС реального ПП (красный график – ниже) и идеального ПП (черный график – выше)

Вейвлет-анализ, как было отмечено, позволяет анализировать спектральный состав ПП. Особенно важно, что он применим при анализе быстротекущих ПП. Поэтому полученные результаты представляют особый интерес при анализе работоспособности электрических машин различных конструкций – цилиндрических и линейных. В последнее время линейные электрические машины получили широкое распространение в различных областях деятельности человека: станочное оборудование, устройства управления, системы точного позиционирования, транспортные системы и др. Это связано с тем, что в отличие от цилиндрических машин линейные позволяют получать возвратно-поступательное движение без применения дополнительных преобразующих устройств. Поэтому обеспечение работоспособности линейного двигателя в течение определенного промежутка времени возможно только при оценке его ресурса, например, предложенным методом расчета, построения и анализа вейвлетов его переходных процессов. Например, для шлифовального станка знание ресурса линейного двигателя системы электропривода гарантирует работоспособность всего устройства, а следовательно, обеспечивает соответствующее качество обработки деталей [19–21].

Заключение

Сравнивая реальный и идеальный ПП при напряжениях испытания 0,7 от номинального напряжения обмотки статора $U_{ном}$, можно сделать вывод:

1. Графики вейвлетов визуально практически идентичны. Сравнение двух вейвлетов позволит оценить текущее состояние машины, а следовательно, сделать выводы об ее работоспособности и возможном ресурсе. На данном этапе объяснить, что именно и как происходит в электрической машине, можно только с определенной долей вероятности. Однако уже с уверенностью можно сказать, что по причине наличия отклонений вейвлетов реального ПП от идеального в машине действительно происходят некоторые изменения, влияющие на ее работоспособность.
2. ИВС незначительно отличаются, почти в каждом эксперименте формы сигнала приблизительно повторяли друг друга.
3. По графикам вейвлетов можно оценить период или частоту токов электрической машины, а также по спектральному составу – качество информации, полученной с помощью измерительной аппаратуры.

4. В результате исследований выдвинута гипотеза, что электрическая машина имеет ряд неисправностей. Однако для более точной оценки состояния и подтверждения выдвинутой гипотезы необходимо проводить дальнейшие исследования уже на реальном объекте.

5. Предложенный в статье метод оценки текущего технического состояния электрической машины по анализу вейвлетов переходных процессов имеет огромную практическую значимость, потому что позволит в перспективе оценивать кроме прочего ресурс ЭМ, а следовательно, снижать финансовую нагрузку на предприятие, которое ее эксплуатирует.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по государственному заданию FSNM-2020-0028.

Библиографический список

1. Попов В.В. Электрические машины: введение в электромеханику: машины постоянного тока и трансформаторы: учебник для вузов по направл. подготовки «Электротехника, электромеханика и электротехнологии» и «Электроэнергетика». – СПб.: Питер, 2008.

2. Переходные процессы в электроэнергетических системах / И.П. Крючков, В.А. Старшинов, Ю.П. Гусев, М.В. Пираторов; под ред. И.П. Крючкова. – 2-е., изд., стер. – М.: Изд. дом МЭИ, 2009. – 416 с.

3. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. – 2005. – №1(31). – С. 50–52.

4. Диагностика электродвигателей // Новости электротехники. – 2009. – № 3(57).

5. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shulakov N.V. Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines // Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved). – 2013. – Vol. 58, № 4. – P. 381–392.

6. Sudakov A.I., Chabanov E.A. Precise and reliable identification of the transient processes of a powerful synchronous machine by probabilistic statistical methods // Russian Electrical Engineering. – 2015. – Vol. 86, № 11. – P. 640–645.

7. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Kamenskikh I.A. The Development of Probabilistic and Statistical Methods for Identification of Noisy Transient Processes of Synchronous Machines // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88, № 11. – P. 714–719.

8. Токарев Р.О., Шапошников В.В., Чабанов Е.А. Способы диагностики электрических машин // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 9–11 июня 2020) в 2 т. – Пермь, Изд-во Перм. нац. исследов. политехн. ун-та, 2020. – Т. 2. – С. 93–99.

9. Методы неразрушающего контроля [Электронный ресурс]. – URL: https://www.geo-ndt.ru/nerazrush_kontrol_metodi.htm (дата обращения: 15.06.2021).

10. Спектральный анализ неисправностей синхронной машины / Р.О. Токарев [и др.] // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2019. – № 30.

11. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166. – № 11. – С. 1145–1170.

12. Павлов А.Н. Вейвлет-анализ и примеры его применения // Известия вузов. ПНД. – 2009. – № 5. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/veyvlet-analiz-i-primery-ego-primeneniya> (дата обращения: 17.06.2021).

13. Вашкевич М.И., Азаров И.С. Сравнение частотно-временных преобразований: Фурье-анализ, вейвлеты и банки фильтров на основе фазового преобразования // Цифровая обработка сигналов. – 2020. – № 2. – С. 13–26.

14. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. гос. техн. ун-та, 2003. – 104 с.

15. Хамухин А.А. Итерационный алгоритм вычисления дискретизированного непрерывного вейвлет-преобразования // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2013. – № 3. – С. 9–13.

16. Полищук В.И., Хамухин А.А. Выявление витковых замыканий обмотки ротора синхронного генератора на основе вейвлет-анализа магнитных потоков рассеяния // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2013. – Т. 323. – № 5.

17. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
18. Судаков А.И., Чабанов Е.А. Новый подход к исследованию и идентификации переходных процессов машин: монография. – Пермь: Изд-во Пермь нац. исслед. политехн. ун-та, 2018. – 277.
19. Reduction of the pull effect of a cylindrical linear synchronous motor / S. Shutemov, E. Chabanov, A. Shevkunova, A. Shapshal, T. Talakhadze // The international research conference “Key Trends in Transportation Innovation – 2019”: E3S Web of Conferences 157, 01015 (2020) KTTI-2019 (October 24–26, 2019). – Khabarovsk: Pub. Far Eastern State Transport University, 2019. – URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015701015>
20. A cylindrical linear valve electric motor for the executive mechanism of material application research / A.D. Korotaev, A.T. Kluchnikov, S.A. Lokteev, D.A. Oparin, S.V. Shutemov // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) (27–30 Oct. 2020). – Ufa, Russia. Pub. IEEE. – 2020. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9278484>
21. KavaleroV B.V., Shutemov S.V., Muha M.M. Experimental Researches of the Cylindrical Linear AC Electronic Motor for the Executive Mechanism for Materials Application // International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (22–24 Sept. 2020). – Chelyabinsk, Russia. Pub. IEEE. – 2020. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9216246>

References

1. Popov V.V. Elektricheskie mashiny: vvedenie v elektromekhaniku: mashiny postoiannogo toka i transformatory [Electrical machines: an introduction to electromechanics: DC machines and transfo.Эрmers]. Saint Petersburg: Piter, 2008.
2. Kriuchkov I.P., Starshinov V.A., Gusev Iu.P., Piratorov M.V. Perekhodnye protsessy v elektroenergeticheskikh sistemakh [Transients in the electrical power engineering systems]. Ed. Kriuchkova I.P. 2nd ed. Moscow: Moskovskii energeticheskii institut, 2009, 416 p.
3. Petukhov V.S., Sokolov V.A. Diagnostika sostoianiia elektrodvigateli. Metod spektral'nogo analiza potrebliaemogo toka [Diagnostics of the electric motors state. Spectral analysis method of the consumed current]. *Novosti ElektroTekhniki*, 2005, no. 1(31), pp. 50-52.

4. Diagnostika elektrodvigatelei [Diagnostics of electric motors]. *Novosti elektrotehniki*, 2009, no. 3(57).

5. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Shulakov N.V. Novel approaches to analysis of transition processes identification error by probability-statistical methods during sudden symmetric short-circuit tests of synchronous machines. *Acta Technica CSAV (Ceskoslovensk Akademie Ved)*, 2013, vol. 58, no. 4, pp. 381-392.

6. Sudakov A.I., Chabanov E.A. Precise and reliable identification of the transient processes of a powerful synchronous machine by probabilistic statistical methods. *Russian Electrical Engineering*, 2015, vol. 86, no. 11, pp. 640-645.

7. Sudakov A.I., Chabanov E.A., Kamenskikh I.A. The Development of Probabilistic and Statistical Methods for Identification of Noisy Transient Processes of Synchronous Machines. *Russian Electrical Engineering*, 2017, vol. 88, no. 11, pp. 714-719.

8. Tokarev R.O., Shaposhnikov V.V., Chabanov E.A. Sposoby diagnostiki elektricheskikh mashin [Diagnostics of electric machines]. *Avtomatizirovannye sistemy upravleniia i informatsionnye tekhnologii. Materialy vs Rossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* (Perm', 9-11 June 2020). Perm', Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2020, vol. 2, pp. 93-99.

9. Metody nerazrushaiushchego kontrolya [Methods of non-destructive testing], available at: https://www.geo-ndt.ru/nerazrush_kontrol_metodi.htm (accessed 15 June 2021).

10. Tokarev R.O. et al. Spektral'nyi analiz neispravnostei sinkhronnoi mashiny [Failure Spectral Analysis of the Synchronous Machine]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2019, no. 30.

11. Astafeva N.M. Veivlet-analiz: osnovy teorii i primery primeneniia [Wavelet analysis: bases of theory and examples of application]. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 1996, vol. 166, no. 11, pp. 1145-1170.

12. Pavlov A.N. Veivlet-analiz i primery ego primeneniia [Wavelet analysis and examples of its application]. *Izvestiia vuzov. PND*, 2009, no. 5, available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/veivlet-analiz-i-primery-ego-primeneniya> (accessed 17 June 2021).

13. Vashkevich M.I., Azarov I.S. Sravnenie chastotno-vremennykh preobrazovaniy: Fur'e-analiz, veivlety i banki fil'trov na osnove fazovogo preobrazovaniia [Comparison of frequency-time transforms: Fourier analysis, wavelets and filter banks based on phase transformation]. *Tsifrovaia obrabotka signalov*, 2020, no. 2, pp. 13-26.

14. Iakovlev A.N. Vvedenie v veivlet-preobrazovaniia [Introduction in wavelet transforms]. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2003, 104 p.

15. Khamukhin A.A. Iteratsionnyi algoritm vychisleniia diskretizirovannogo nepreryvnogo veivlet-preobrazovaniia [Iterative algorithm for calculating a discretized continuous wavelet transform]. *Vestnik komp'iuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2013, no. 3, pp. 9-13.

16. Polishchuk V.I., Khamukhin A.A. Vyiavlenie vitkovykh zamykaniy obmotki rotora sinkhronnogo generatora na osnove veivlet-analiza magnitnykh potokov rasseianiia [Detection of winding turns of the rotor winding of a synchronous generator based on wavelet analysis of magnetic flux scattering]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2013, vol. 323, no. 5.

17. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electrical machines]. 2nd ed. Leningrad: Energiia, 1974, 840 p.

18. Sudakov A.I., Chabanov E.A. Novyi podkhod k issledovaniiu i identifikatsii perekhodnykh protsessov mashin [A new approach to the study and identification of transients of machines]. Perm': Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2018, 277.

19. Shutemov S., Chabanov E., Shevkunova A., Shapshal A., Talakhadze T. Reduction of the pull effect of a cylindrical linear synchronous motor. *The international research conference "Ke Trends in Transportation Innovation - 2019": E3S Web of Conferences 157, 01015 (2020) KTTI-2019 (October 24-26, 2019)*. Khabarovsk: Pub. Far Eastern State Transport University, 2019, available at: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015701015>

20. Korotaev A.D., Kluchnikov A.T., Lokteev S.A., Oparin D.A., Shutemov S.V. A cylindrical linear valve electric motor for the executive mechanism of material application research. *International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) (27-30 Oct. 2020)*. Ufa, Russia. Pub. IEEE, 2020, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9278484>

21. KavaleroV B.V., Shutemov S.V., Muha M.M. Experimental Researches of the Cylindrical Linear AC Electronic Motor for the Executive Mechanism for Materials Application. *International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon) (22-24 Sept. 2020)*. Chelyabinsk, Russia. Pub. IEEE. – 2020, available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9216246>

Сведения об авторах

Колпакова Марина Алексеевна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: KolpMA@yandex.ru).

Заборовцев Евгений Андреевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29); ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», Служба главного технолога, Конструкторское бюро сервоэлектроприводов (КБ СЭП), инженер-конструктор (614990, Пермь, ул. 25 Октября, 106, e-mail: zbrvtsv@ya.ru).

Чабанов Евгений Александрович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника и электромеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

About the authors

Marina Alekseevna Kolpakova (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: KolpMA@yandex.ru).

Evgenii Andreevich Zaborovtsev (Perm, Russian Federation) – Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.); Public Joint Stock Company "Perm Scientific and Production Instrument Making Company", Chief Technologist Service, Design Bureau of Servo Electric Drives (KB SEP), design engineer (614990, Perm, 25 October str., 106, e-mail: zaborovtcev@mail.ru).

Evgenii Aleksandrovich Chabanov (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of Department of Electrical Engineering and Electromechanics of Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky pr. 29, e-mail: ceapb@mail.ru).

Получено 18.05.2021